

34. Lu, W. Optical properties of aligned carbon nanotube systems studied by effective-medium approximation method [Текст] / W. Lu, J. Dong, Li Zhen-Ya // Phys. Rev. B. – 2000. – V. 63. – P.033401-033404.
35. Tanaka, K. The Science and Technology of Carbon Nanotubes [Текст] / K. Tanaka, T. Yamabe, K. Fukui. – New York: Elsevier, 1999. – 199 p.
36. Baylis, A. Boundary Conditions for the Numerical Solutions of Elliptic Equations in Exterior regions [Текст] / A. Baylis, M. Gunzburger, M. Turkel // SIAM J. Appl. Math. – 1980. – V. 1. – P. 371-385.
37. Матвеев, А.Н. Оптика [Текст] / А.Н. Матвеев. – Москва: Высш. шк., 1985. – 342 с.
38. Volakis, J.L. Finite Element Method for Electromagnetics [Текст] / J.L. Volakis, A. Cbatterjee, L.C. Kempel. – IEEE Press, 1998. – 344 p.
39. Jin, J. The Finite Element Method in Electromagnetics. Second Edition [Текст] / J. Jin. – New York: Wiley, 2002. – 753 p.
40. Chew, W.C. A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates [Текст] / W.C. Chew, W.C. Weedon // Microwave Opt. Tech. Lett. – 1994. – V. 7. – P. 599-604.
41. Sacks, Z.S. A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition [Текст] / Z.S. Sacks, D.M. Kingsland, R. Lee, J.F. Lee // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1995. – V. 43. – P. 1460-1463.

В результаті проведених теоретичних та експериментальних робіт встановлені склад шихти і хімічний склад синтезованих термітних теплостійких і жароміцних сталей, їх фізико-механічні і службові властивості. Виявлено вплив температури на коефіцієнт лінійного розширення, коефіцієнт теплопровідності, питомий електричний опір, критичні точки у термітних сталях

Ключові слова: металотермія, терміт, синтез, властивості, критичні точки, мікроструктура, теплостійкі і жароміцні сталі

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ установлены состав шихты и химический состав синтезированных термитных теплостойких и жаропрочных сталей, их физико-механические и служебные свойства. Выведено влияние температуры на коэффициент линейного расширения, коэффициент теплопроводности, удельное электрическое сопротивление, критические точки в термитных сталях

Ключевые слова: металлотермия, термит, синтез, свойства, критические точки, микроструктура, теплостойкие и жаропрочные стали

УДК 620.22; 669.017

СИНТЕЗ ТЕРМІТНИХ ТЕПЛОСТІЙКИХ І ЖАРОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

Ю. Ю. Жигуц

Доктор технічних наук, професор
Кафедра технології машинобудування

Ужгородський
національний університет
вул. Підгірна, 46, м. Ужгород,
Україна, 88000

E-mail: yuzhiguts@gmail.com

1. Вступ

Теплостійкі і жароміцні сталі використовуються для виготовлення труб паронагрівачів, паротрубопроводів, колекторів енергетичних пристроїв, арматури парових котлів та паротрубопроводів, труб гідрогенізаційних пристроїв та деталей нафтотехнічної апаратури.

У практиці термінового виготовлення виливків широко застосовуються відомі ще з минулого століття металотермічні методи отримання сталей, які засновані на алюмінотермічному відновленні заліза при горінні термітної суміші, у склад якої додають легуючі елементи. Ці методи стають економічно виправданими тоді, коли використовуються їх головні переваги – висока продуктивність, повна автономність технології і незалежність від потужних джерел електроенергії, складного ливарного промислового обладнання, можливість син-

тезувати литі сталі практично любого класу, малий час на підготовку і організацію виробництва та простота технічного обслуговування технологічного процесу металотермічного синтезу. Все вищенаведене призводить до необхідності поєднання переваг металотермічного способу синтезу матеріалу і унікальних властивостей середньолегованих теплостійких і жароміцних сталей.

2. Мета роботи

Встановити можливість отримання середньолегованих термітних теплостійких і жароміцних сталей, дослідити їх мікроструктуру, фізико-механічні, технологічні і службові властивості та запропонувати галузі найбільш доцільного їх застосування.

3. Постановка проблеми і задач дослідження

При необхідності екстреного ремонту механізму виникає необхідність у використанні металотермічних методів синтезу сталей [1]. Методи металотермії дозволяють отримувати виливки з високою продуктивністю за короткий проміжок часу. Ці методи придатні і для зварювання і наплавлення термітних залізуглецевих сплавів [2–5]. Крім перерахованого слід звернути увагу і на те, що для компонування металотермічної шихти можна використовувати відходи металлообробного і термічного виробництва, а саме залізню окалину, алюмінієву стружку і недопалки промислових графітових електродів електродугових печей та ін.

Застосування металотермічних способів синтезу матеріалів для термінового отримання виливків з термітних сталей і швидкої заміни відпрацьованих деталей дозволяє частково вирішити проблему екстреного виготовлення і ремонту деталей з середньолегованих термітних теплостійких і жароміцних сталей. Саме з цією метою потрібно дослідити вплив металотермічного способу синтезу на хімічний склад, структуру та властивості термітних чавунів та вибрати хімічний склад, що забезпечить оптимальну структуру чавуну при отриманні найкращих властивостей.

4. Вихідні матеріали, методика приготування металотермічної шихти

Матеріали використані для компонування металотермічної суміші: ферохром ФХ65-7А ГОСТ 4757079; силікомарганець СМн26 ГОСТ 4756-77; феросиліцій ФС65Ал3,5 ГОСТ 1415-78; порошок алюмінієвий марок ПА-3 – ПА-4 ГОСТ 6058-73 та просіяне млино алюмінієвої стружки; феромарганець ФМн70 ГОСТ 4761-80; залізна окалина (ковальського і прокатного виробництва) з середнім хімічним складом (% за масою): 0,05 С; 0,10-0,35 Si; 0,10-0,35 Mn; 0,01-0,03 S; 0,01-0,03 P; 40-50 Fe₂O₃; 50-60 FeO та ін.

Для визначення маси металевого зливка і виходу металу з шихти були проведені мікроплавлення при масі шихти 300 г у металотермічному реакторі діаметром 80 мм з різним процентним співвідношенням компонентів у суміші. Ініціювання процесу горіння проводилося спеціальним термітним сірником.

Шихта попередньо розраховувалася за стехіометричним співвідношенням компонентів реакції [6], а у наступному враховували засвоєння окремих компонентів реакції за допомогою коефіцієнтів [1]. Порошкову шихту попередньо просували при температурі 150-180°C, перемішували і ущільнювали, а після цього розміщували у камеру металотермічного реактора. Для покращення шлаковідділення у шихту додавали польовий шпат (CaF₂).

Після плавлення відділяли сплав від шлаку, оцінюючи структуру шлаку, і проводили контрольне зважування та встановлення величини виходу металу з шихти, досліджувався синтезований зливочок. Третій етап [6] полягав у корекції складу шихти за рахунок внесення відповідних феродомішків (феромарганцю, ферохрому та ін.), які дозволяють синтезувати необхідний хімічний склад сплаву. Для регулювання

температури горіння у склад шихти вводили також інертні домішки.

5. Методика термохімічних розрахунків та теоретичні дослідження

Після встановлення складу шихти за стехіометричними коефіцієнтами хімічної реакції та корекції її коефіцієнтами засвоєння компонентів шихти, проводили розрахунок адіабатичної температури горіння [1,6]. При проведенні розрахунків за існуючими методиками не враховували сублімацію алюмінію, що дає несуттєву похибку встановлення адіабатичної температури (T_a) та теплоти утворення продуктів реакції (Q). Основний критерій отримання зливків – T_a повинна для всіх реакцій бути вище температури плавлення ($T_{пл}$) продуктів реакції. Розрахунок T_a зрозуміло не враховує і тепловтрати у процесі горіння, а також повноту перетворення реагентів у продукти реакції. У спрощеній схемі розрахунку T_a визначали без врахування точних значень теплоємностей, а тепловий ефект встановлювали при середній температурі (наприклад, 2500 К). Зміною ж теплового ефекту, коли продукти реакції знаходяться у рідкому стані, можна знехтувати.

При відповідних значеннях ентальпій продукту горіння T_a розраховували за формулою:

$$T_a = T_{пл} + \frac{Q - L - \Delta H(T_{пл})}{C_{рідк}},$$

де C та L – відповідно теплоємність і теплота продукту горіння.

Помилку, пов'язану із екстраполяцією, оцінюють у сто градусів.

6. Результати експериментальних досліджень

В результаті проведення експериментальних плавлень з використанням розрахованого складу екзотермічної шихти отримано такі марки термітних сталей – аналоги промисловим маркам 12ХМФ, 15ХМФ, 12Х2МФБ, 25Х2МФ.

При проведенні експериментальних досліджень встановлювали хімічний склад синтезованих термітних сталей (табл. 1). Найбільшу жароміцність (опір повзучості і витривалість міцність) виявляють хромомолібденованадієві термітні сталі, меншу на 12-16% хромомолібденові сталі. Крім меншої жароміцності хромомолібденові термітні сталі схильні ще і до графітизації, що обмежує їх використання при виготовленні паронагрівачів і паротрубопроводів тому, що в результаті тривалого нагріву виникає розкладання цементиту з утворенням графіту. Найбільш інтенсивно цей процес проходить при температурах вище 500°C. Найбільш показово його можна спостерігати на $A_{с5}^{\circ}C$. Ця характерна особливість спостерігається і у інших термітних сталях [7-10].

Особливістю металотермічного способу синтезу є також наявність алюмінію у складі металотермічної шихти і, як наслідок, притаманна тільки цьому спо-

собоу схема мікролегуювання і дорозкислення термітної сталі. Незважаючи на значний градієнт температур при формуванні виливка цей спосіб синтезу сплаву дозволяє отримуваний 6-7 бал зерна. Зауважимо, що крупнозернисті термітні сталі погано піддаються графітизації на відміну від дрібнодисперсних, дорозкислених алюмінієм з шихти.

високу жароміцність, але і витривалу пластичність. У термітній сталі 12Х2МФБ зміцнення досягали в результаті дисперсійного тверднення та виділення у структурі сплаву інтерметалідної фази Лавеса (на зразок Fe_2Mo та Fe_2Nb), що дозволяє рекомендувати використання цієї сталі при температурах до 670°C .

Продовження експериментальних досліджень

Таблиця 1

Хімічний склад термітних теплостійких і жароміцних сталей

Марка сталі	C	Si	Mn	Mo	Cr	V	Ni	Cu	S	P	Інші
12ХМФ	0,08-0,16	0,16-0,38	0,42-0,65	0,30-0,37	0,6-1,1	0,15-0,30	0,25-0,30	0,20-0,25	0,020-0,030	0,030-0,040	-
15ХМФ	0,10-0,14	0,16-0,35	0,40-0,65	0,91-1,10	1,10-1,40	0,25-0,30	0,15-0,25	-	0,020-0,025	0,025-0,030	-
12Х2МФБ	0,08-0,11	0,35-0,65	0,45-0,70	0,55-0,70	2,2-2,5	0,25-0,35	0,20-0,25	0,20-0,25	0,025-0,030	0,025-0,030	0,5-0,6 Nb
25Х2МФ	0,22-0,29	0,15-0,35	0,35-0,65	0,95-1,15	2,2-2,5	0,35-0,45	-	-	0,025-0,030	0,025-0,030	-

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити, що хром і ніобій перешкоджають процесу графітизації. Навіть незначний вміст хрому (до 1%) у термітній сталі дозволяє повністю запобігти графітизації. Одночасно хром не погіршує технологічних і службових властивостей термітної сталі при температурах до 500°C . Вказані вище хромомолібденові сталі непогано зварюються термітним способом.

Для встановлення галузей застосування термітних теплостійких і жароміцних сталей досліджені їх фізичні та механічні властивості. Отримані результати (табл. 2-5) показують, що термітні сталі не поступаються за цими показниками ординарним промисловим сталям, а за деякими з них (ударною в'язкістю та пластичністю) навіть переважають їх на 12-14%.

Більша жароміцність термітних хромомолібденованадієвих сталей пояснюється не тільки зміцненням твердого розчину вольфрамом (який зменшує швидкість дифузійних процесів), але і розподілом термостійких високодисперсних карбідів ванадію, що також зміцнюють сплав. Найчастіше карбіди ванадію розподіляються у дефектах мартенситних кристалів. Зазначимо, що алюмінотермічний спосіб отримання сплаву сприяє додатковому дорозкисненню термітної сталі і видаляє з неї оксиди заліза.

При швидкому охолодженні виливків з термітної сталі карбіди ванадію рівномірно розподіляються по тілу виливка і тому значення ударної в'язкості (a_H) знаходиться на достатньо високому рівні (табл. 5). Якщо ж виливок значної маси отримується у футерованому магnezитом металотермічному реакторі, то зменшення тепловідводу та уповільнене охолодження внаслідок цього, призводить до виділення карбідів ванадію в укрупненому виді на границях зерен, що суттєво зменшує a_H . В той же час рівномірний розподіл дрібнодисперсних карбідів ванадію забезпечує не тільки

було направлено на встановлення границі повзучості (рис. 1а) та границі витривалості міцності (рис. 1б) термітних сталей від температури. Отримані залежності границі повзучості при швидкості повзучості 1% за 100000 год. і границі витривалості міцності за 100000 год.

Проведене порівняння границі текучості для різних видів термітних сталей показало, що при $450-500^\circ\text{C}$ найкращі властивості проявляє термітний аналог сталі 12ХМФ, при $500-550^\circ\text{C}$ - 15ХМФ, а при температурах $600-650^\circ\text{C}$ - 15Х2МФ. Порівнюючи ж границю

витривалості міцності термітних сталей встановлено, що цей показник найвищий у термітного аналога сталі 25Х2МФ.

Співставлення властивостей термітних сталей з промисловою найтипівішою хромонікелевою сталлю Х18Н9Т дозволяє виявити, що термітні сталі аналоги 15ХМФ, 12Х2МФБ та 25Х2МФ в діапазоні температур $550-600^\circ\text{C}$ незначно поступаються аустенітній промисловій сталі за границею витривалості міцності (на 3-5%), а в діапазоні $500-550^\circ\text{C}$ знаходяться на одному рівні.

Аналіз результатів проведених досліджень дозволив встановити не тільки фізико-механічні та службові властивості термітних сталей, порівняти їх з промисловими аналогами, але і запропонувати температурний інтервал безпечного застосування термітних середньолегованих теплостійких і жароміцних сталей.

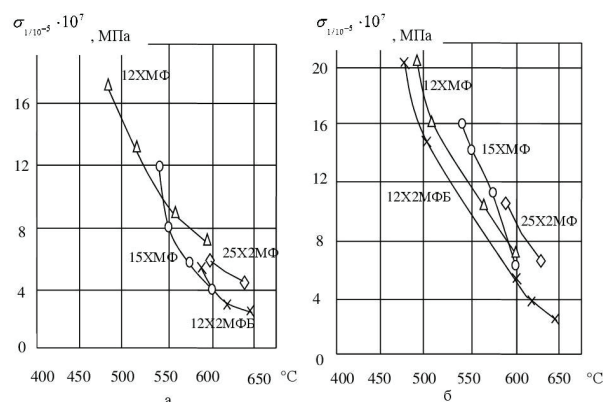


Рис. 1. Залежність границі повзучості та границі витривалості міцності термітних сталей від температури: а) границі повзучості; б) границі витривалості міцності

Таблиця 2

Густина та коефіцієнт лінійного розширення термітних сталей

Марка термітного аналога промислової сталі	$\gamma, \times 10^3, \text{кг/м}^3$	$\alpha \cdot 10^6, \text{мм/мм}^\circ\text{C}$ у межах температур $^\circ\text{C}$					
		10-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600
12ХМФ	7,81	10,6	11,5	12,10	12,9	13,5	13,8
15ХМФ	7,82	11,1	11,5	12,47	13,2	13,7	13,9
12Х2МФБ	7,82	11,4	12,1	12,3	13,0	13,3	13,5
25Х2МФ	7,81	12,3	12,7	13,4	13,8	14,2	14,8

Таблиця 3

Коефіцієнт теплопровідності (λ), питома теплоємність (C) та температури критичних точок термітних сталей

Марка термітного аналога сталі	$\lambda, \text{Вт/м}^\circ\text{C}$ при $t^\circ\text{C}$						$C, \text{кал/г}^\circ\text{C}$	Критична точка, $^\circ\text{C}$			
	100	200	300	400	500	600		A_{C1}	A_{C3}	A_{r3}	A_{r1}
12ХМФ	25,79	25,32	25,32	24,12	23,88	23,41	0,120	770-780	870-900	830-850	720-750
15ХМФ	2,341	22,69	21,17	20,30	19,35	18,87	0,115	760-800	900-980	860-900	730-790
12Х2МФБ	14,57	14,81	15,52	16,48	16,96	19,11	0,110	880-910	990-1100	860-900	840-760
25Х2МФ	18,87	18,63	17,91	16,96	16,48	15,05	0,114	730-760	850-880	710-700	690-710

Таблиця 4

Питомий електричний опір термітних сталей

Марка термітного аналога промислової сталі	$\rho, \text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ при $t^\circ\text{C}$									
	20	50	100	150	200	250	300	400	500	600
12ХМФ	0,272	0,2899	0,3111	0,3510	0,3897	0,4318	0,4843	0,5883	0,6817	0,8316
15ХМФ	0,255	0,273	0,289	0,317	0,356	0,395	0,431	0,518	0,630	0,710
12Х2МФБ	0,401	0,415	0,445	0,473	0,515	0,534	0,581	0,641	0,743	0,811
25Х2МФ	0,271	0,316	0,358	0,393	0,428	0,466	0,498	0,530	0,691	0,812

Таблиця 5

Механічні властивості термітних сталей

Марка термітного аналога промислової сталі	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	φ	$a_{\text{н}}$, Н·м/м ²
	МПа		%		
12ХМФ	490-670	260-280	19-21	50-55	50-60
15ХМФ	610-700	370-350	17-19	48-52	45-52
12Х2МФБ	420-450	220-240	23-27	45-47	37-45
25Х2МФ	850-920	730-780	11-16	42-47	32-35

7. Висновки та практичні рекомендації

1. Теоретично і експериментально доказана можливість синтезу металотермічним способом термітних сталей, аналогів промислових марок 12ХМФ, 15ХМФ, 12Х2МФБ, 25Х2МФ.
2. Розраховані склади шихт для синтезу термітних сталей вказаних марок.
3. Встановлено хімічний склад синтезованих термітних сталей.
4. Виявлені фізико-механічні властивості термітних сталей та залежності коефіцієнту лінійного роз-

- ширення, коефіцієнту теплопровідності, питомого електричного опору від температури.
5. Встановлено критичні точки A_{C1} , A_{C3} , A_{r3} та A_{r1} для термітних сталей.
6. Проведено аналіз мікроструктури синтезованих термітних сталей, вплив окремих фазових складових (зокрема карбідів ванадію) на властивості сталей та вплив металотермічного способу синтезу на структуру сплаву.
7. Встановлені значення границі повзучості і границі витривалої міцності для синтезованих термітних сталей, а також їх залежність від температури.

Література

1. Жигуц, Ю. Ю. Сплави, синтезовані металотермією і СВС-процесами [Текст] / Ю. Ю. Жигуц. — Ужгород: Гражда, 2008. — 276 с.
2. Металотермічний реактор [Текст]: пат. 20045 Україна: МПК В22С9/00 / Жигуц Ю.Ю., Скиба Ю.Ю., Крайняк І.І.; заявник і патентовласник Ужгородський національний університет. — № u200606530. заяв. 13.06.06; опубл. 15.01.07, Бюл. №1. — 6 с.
3. Жигуц, Ю. Ресурсозберігаюча технологія термітного зварювання сталевих деталей [Текст] / Ю. Жигуц, В. Лазар // Вісник ТДТУ. — 2009. — Т. 14, № 4. — С. 94—98.

4. Жигуц, Ю. Ю. Технология производства термитного высокопрочного чугуна [Текст] / Ю. Ю. Жигуц, В. Ф. Лазар, Л. И. Косюк // Міжн. збірн. наук. праць. «Прогресивні технології і системи машинобудування. «Донецький нац. техн. ун-тет». — 2012. — № 1,2 (43). — С. 142–147.
5. Чернега, Д. Ф. Использование термитных высоколегированных сталей для питания отливок [Текст] / Д. Ф. Чернега, Й. Й. Лучко, Ю. Ю. Жигуц // «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Збірник наук. праць. — 2012. — № 9. — С. 279–285.
6. Жигуц, Ю. Ю. Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу [Текст] / Ю. Жигуц, В. Широков // Машинознавство. — 2005. — № 4. — С. 48–50.
7. Жигуц, Ю. Ю. Синтез термітної хромонікелевої сталі X18H9T [Текст] : Materiały IX międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji „Kluczowe aspekty naukowej działalności”. V. 16. Techniczne nauki.— Przemysł: Nauka i studia, 2013. — С. 3–5.
8. Жигуц, Ю. Ю. Синтез термітних кавітаційностійких сталей [Текст] / Ю. Ю. Жигуц // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Прикладная физика и материаловедение. — 2013. — №1/5 (61). — С. 4–6.
9. Жигуц, Ю. Ю. Синтез термітної сталі 35Л [Текст] / Ю. Ю. Жигуц // «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Збірник наук. праць. — 2012. — № 9. — С. 215–221.
10. Жигуц, Ю. Ю. Технологія отримання термітних суднобудівних сталей [Текст] / Ю. Ю. Жигуц // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Збірник наукових праць. — 2012. — № 3 (28). — С. 283–286.

В даній роботі досліджено залежності температури кристала кремнієвого фотоперетворювача з урахуванням концентрації світлового потоку і конструкції фоклінного концентратора в залежності від температури навколишнього середовища, кратності коефіцієнта концентрації та умов тепловідводу. Показана можливість збільшення щільності світлового потоку в 1,5-2,8 і необхідність додаткових конструктивних елементів для забезпечення нормального теплового режиму кристала

Ключові слова: концентратор, фотоперетворювач, сонячний елемент, коефіцієнт концентрації, щільність світлового потоку

В данной работе исследованы зависимости температуры кристалла кремниевого фотопреобразователя с учетом концентрации светового потока и конструкции фоклинного концентратора в зависимости от температуры окружающей среды, кратности коэффициента концентрации и условий теплоотвода. Показана возможность увеличения плотности светового потока в 1,5-2,8 и необходимость дополнительных конструктивных элементов для обеспечения нормального теплового режима кристалла

Ключевые слова: концентратор, фотопреобразователь, солнечный элемент, коэффициент концентрации, плотность светового потока

УДК 621.315.592

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ФОКЛИННЫМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ

Н. И. Слипченко

Доктор физико-математических наук, профессор,
проректор по научной работе*

E-mail: nslip@kture.kharkov.ua

В. А. Письменецкий

Кандидат технических наук, профессор*

E-mail: Cntm@ukr.net

Е. С. Глушко

Стажер-исследователь*

E-mail: Glushkoolena@gmail.com

Н. В. Герасименко

Младший научный сотрудник*

E-mail: n.v.gerasimenko@mail.ru

*Кафедра микроэлектронных

приборов и устройств

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

В настоящее время солнечная энергетика, базирующаяся на использовании солнечных элементов (СЭ), считается перспективной для создания экологически чистых, ресурсосберегающих и в перспективе

экономичных источников электрической и тепловой энергии. По оценкам экспертов Международного энергетического агентства к 2050г. 20-25% потребности человечества в электричестве будет обеспечиваться за счет солнечной энергии. К этому времени при сохранении темпов распространения передовых технологий